

VARIABILITAS SUHU DI PERAIRAN SENUNU, SUMBAWA BARAT

TEMPERATURE VARIABILITY AT SENUNU BAY, WEST SUMBAWA

Syamsul Hidayat¹, Mulia Purba^{2*}, dan Jorina Waworuntu³

¹Badan Perencanaan Pembangunan Daerah, Kabupaten Sumbawa Barat, Taliwang

²Dept Ilmu dan Teknologi Kelautan FPIK-IPB, Bogor; *email: mpurbas@ipb.ac.id

³Environmental Department, PT Newmont Nusa Tenggara

ABSTRACT

The purposes of this study were to determine the variability of temperature and its relation to regional processes in the Senunu Bay. The result showed clear vertical stratifications i.e., mixed layer thickness about 39-119 m with isotherm of 27°C, thermocline layer thickness about 83-204 m with isotherm of 14-26°C, and the deeper layer from the thermocline lower limit to the sea bottom with isotherm <13°C. Temperature and the thickness of each layers varied with season in which during the Northwest Monsoon the temperature was warmer and the mixed layer was thicker than those during Southeast Monsoon. During Southeast Monsoon, the thermocline layer rose about 24 m. The 2001, 2006, and 2009 (weak La Nina years), the Indonesia Throughflow (ITF) carried warmer water, deepening thermocline depth and reducing upwelling strength. In 2003 and 2008 thickening of mixed layer occurred in transition season was believed associated with the arrival of Kelvin Wave from the west. In 2002 and 2004 (weak El Nino period,) ITF carries colder water shallowing thermocline depth and enhancing upwelling strength. In 2007 was believed to be related with positive IODM where the sea surface temperature were decreasing due to intensification of southeast wind which induced strong upwelling. The temperature spectral density of mixed layer and thermocline was influenced by annual, semi-annual, intra-annual and inter-annual period fluctuations. The cross-correlation between wind and temperature showed significant value in the annual period.

Keywords: temperature, thermocline, variability, ENSO, IODM.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan variabilitas suhu dan kaitannya dengan proses-proses lokal dan regional. Hasil penelitian menunjukkan stratifikasi vertikal yang jelas yaitu lapisan tercampur dengan ketebalan 39-119 m dan isoterm di atas 27°C, lapisan termoklin dengan ketebalan 83-204 m dan isoterm 14-26°C, dan lapisan dalam dari batas bawah termoklin sampai dasar perairan dengan isoterm kurang dari 13°C. Suhu dan ketebalan setiap lapisan bervariasi berdasarkan musim dimana pada Musim Barat suhu lebih hangat dan lapisan tercampur lebih tebal dibandingkan Musim Timur. Pada Musim Timur lapisan termoklin terangkat sekitar 24 m. Pada tahun 2001, 2006, dan 2009 (periode La Nina lemah) suhu di lapisan permukaan lebih hangat, lapisan termoklin lebih tebal dan intensitas upwelling melemah diduga disebabkan oleh Arlindo membawa massa air hangat yang menyebabkan lapisan termoklin bertambah dalam dan intensitas upwelling melemah. Pada tahun 2003 dan 2008 penebalan lapisan tercampur terjadi pada Musim Peralihan I dan diduga berkaitan dengan tibanya Gelombang Kelvin. Pada tahun 2002 dan 2004 (periode El Nino lemah) menyebabkan suhu lapisan permukaan lebih dingin, lapisan termoklin lebih dangkal dan intensitas upwelling menguat. Tahun 2007 diduga berkaitan dengan IODM positif dimana SPL menurun akibat terjadinya intensifikasi angin yang lebih kuat di atas perairan Samudera Hindia tropis bagian timur dan selatan Jawa Sumbawa yang mengakibatkan upwelling yang kuat di wilayah ini. Spektrum densitas suhu pada lapisan tercampur dan termoklin dipengaruhi fluktuasi tahunan, setengah tahunan, intra-tahunan dan antar-tahunan. Korelasi silang angin dan suhu menunjukkan korelasi erat pada periode tahunan.

Kata kunci: suhu, termoklin, variabilitas, ENSO, IODM

I. PENDAHULUAN

Sirkulasi dan karakter massa air di perairan selatan Sumbawa yang terletak di timur laut S. India dipengaruhi oleh fenomena loka dan non-lokal. Sistem angin muson yang berubah arah sesuai musim merupakan fenomena lokal yang mengakibatkan variabilitas musiman dan tahunan (Wyrтки, 1961; Fieux *et al.*, 1993; Clark *et al.*, 1999). Fenomena non-lokal yang berinteraksi dengan sistem angin selain mempengaruhi variabilitas semi tahunan dan tahunan juga akan menimbulkan variabilitas antar tahunan. Berbagai peran dari fenomena ini akan terekam terutama dalam variabilitas suhu baik secara spasial dan temporal serta variabilitas lapisan permukaan tercampur dan termoklin.

Pada saat bertiup Angin Muson Tenggara (Juni – September) di wilayah ini poros Arus Katulistiwa Selatan (AKS) bergeser ke dekat panta Jawa – Sumbawa dan proses upwelling dapat terjadi sehingga lapisan permukaan tercampur lebih tipis dan suhunya menurun serta termoklin terangkat (Wyrтки, 1962; Purba, 2007). Pada musim ini intensitas Arus Lintas Indonesia (ARLINDO) yang masuk dari sisi timur menaik. Variabilitas ARLINDO dipengaruhi oleh fenomena El Nino dan La Nina. Selama El Nino (La Nina) Arlindo membawa massa air yang lebih dingin (hangat) sehingga menyebabkan pendangkalan (pendalaman) lapisan termoklin dan menguatkan (mengurangi) intensitas upwelling di sepanjang pantai barat Sumatera hingga selatan Jawa Hautala *et al.*, 1996; Ffield *et al.*, 2000; Gordon *et al.*, 2003; Susanto *et al.*, 2005; McClean *et al.*, 2005). Menurut Susanto *et al.* (2001), pada saat periode El Nino, wilayah upwelling di sepanjang pantai barat Sumatera hingga selatan Jawa meluas hingga mendekati ekuator dan berlangsung lebih lama hingga November

dari biasanya hanya sampai bulan Oktober.

Pada saat Angin Musson Barat Daya bertiup (Desember - Pebruari), poros AKS bergeser ke selatan dan Arus Pantai Jawa (APJ) mengalir ke timur (Soeriatmadja, 1957; Wyrтки, 1962). APJ membawa massa air yang lebih hangat dan lapisan permukaan tercampur menjadi lebih tebal (Sprintall *et al.*, 2000). Pada musim peralihan (Mei dan Oktober), Gelombang Kelvin dapat memasuki wilayah ini dari sisi barat. Sprintall *et al.* (2000) menunjukkan bahwa anomali suhu yang lebih hangat pada bulan musim peralihan I (April/Mei) di pantai selatan Jawa berkaitan dengan tibanya Gelombang Kelvin. Kondisi ini menyebabkan penebalan lapisan tercampur dan termoklin semakin tertekan ke bawah. Fenomena Indian Ocean Dipole Mode (IODM) yang terjadi di S. India tropis mempengaruhi variabilitas karakter massa air di wilayah ini. Saat terjadi IODM positif yang berkaitan dengan pendinginan suhu permukaan laut dan pendangkalan lapisan termoklin serta menguatnya intensitas upwelling di bagian timur Samudera Hindia dimana pengaruh fenomena ini dapat juga mencapai selatan Jawa – Sumbawa (Saji *et al.*, 1999; Saji and Yamagata, 2003).

Penelitian sebaran menegak suhu perairan secara temporal penting untuk mengetahui stratifikasi vertikal massa air. Fluktuasi ketebalan lapisan permukaan tercampur dan naik turunnya lapisan termoklin memberi sinyal tentang terjadinya proses upwelling ataupun downwelling serta tibanya massa air tertentu di lokasi studi. Analisis spektrum akan memberikan informasi tentang variabilitas yang terjadi dan fenomena yang diperkirakan penyebab variabilitas. Informasi karakter massa air dan dinamikanya sangat penting mengerti proses fisik, kimia dan biologi daerah studi. Adanya proses upwelling dapat

memberi indikasi meningkatnya kesuburan perairan sehingga dapat digunakan untuk pemanfaatan sumber-daya hayatinya. Variabilitas ketebalan lapisan permukaan tercampur dan kenaikan suhu laut dapat digunakan untuk mempelajari tren pemanasan global dan kaitannya dengan pengelolaan sumber.

Tujuan penelitian ini adalah menentukan menelaah variabilitas sebaran vertikal suhu air laut secara temporal dengan analisis spektrum dan kaitannya terhadap proses regional di perairan Senunu.

II. METODE PENELITIAN

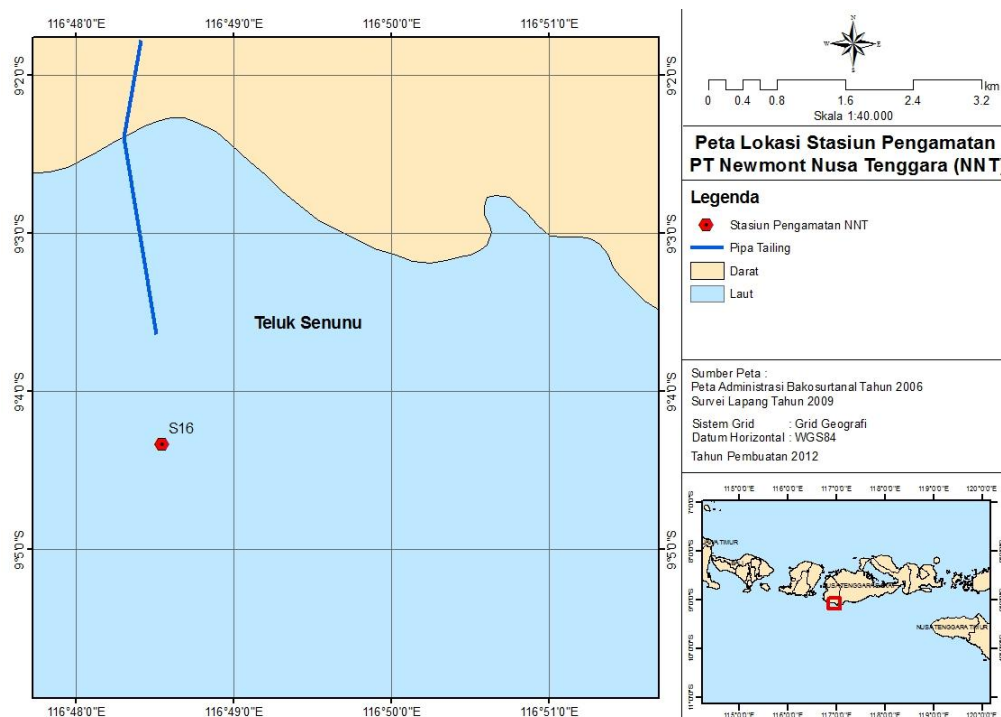
2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di perairan barat daya Sumbawa yang merupakan bagian dari perairan timur laut Samudera Hindia. Lokasi penelitian berada pada posisi koordinat stasiun 116.8091° BT dan 9.0723° LS (Gambar 1).

2.2. Data Angin

Data angin yang digunakan merupakan angin harian hasil analisis ulang yang diperoleh dari situs <http://www.ifremer.fr/cersat/en/data/download/gridded/mwfsqscat.htm> periode Januari 2000 - November 2009 dengan resolusi spasial 0.5° x 0.5° atau sekitar 50 km x 50 km. Data tersebut kemudian dijadikan rata-rata bulanan. Data yang digunakan adalah data kecepatan angin yang terdiri atas komponen zonal (timur-barat) dan komponen meridional (utara-selatan).

Data angin hasil reanalisis yang berformat *NetCDF* diekstraksi dengan bantuan perangkat lunak *Ocean Data View 4* sehingga dihasilkan data dalam format dokumen (.txt) yang bisa diolah di perangkat lunak *Microsoft Excel 2007*. Selanjutnya setiap data dibuatkan sebaran temporalnya menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View 4*.



Gambar 1. Lokasi penelitian

2.3. Data Suhu

Data suhu dari Januari 2000-November 2009 diperoleh dari hasil pengukuran rutin bulanan yang dilakukan oleh PT Newmont Nusa Tenggara. Data suhu ini diasumsikan sebagai data bulanan karena rentang dan kekerapan pengukuran suhu selama 21-35 hari lebih dari 50% dari total seluruh pengukuran. Pengukuran suhu dilakukan rata-rata satu kali dalam satu bulan selama periode tersebut. Jangka waktu tersebut dipilih dengan pertimbangan bahwa pada rentang periode tersebut diharapkan dapat ditentukan variabilitas suhu dengan periode fluktuasi yang bersifat antar-tahunan. Selain itu, dipertimbangkan juga ketersediaan data dimana pada jangka waktu tersebut data hasil pengukuran suhu tersedia hampir setiap bulan.

Data suhu diambil secara vertikal sehingga diperoleh data yang mewakili kondisi seluruh lapisan kedalaman perairan. Suhu diukur menggunakan alat *Conductivity Temperature Depth* (CTD) sehingga diperoleh data profil menegak. Pada penelitian ini juga ditentukan anomali suhu. Anomali suhu merupakan nilai perbedaan antara suhu pada satu bulan tertentu dibandingkan dengan nilai suhu rata-rata bulan tersebut selama 10 tahun.

Data suhu selama satu tahun dibagi berdasarkan pembagian musim menurut Wyrski (1961), yaitu suhu bulan Desember-Februari mewakili kondisi Musim Barat, suhu bulan Maret-Mei mewakili Musim Peralihan I, suhu bulan Juni-Agustus mewakili Musim Timur dan suhu bulan September-November mewakili Musim Peralihan II.

2.4. Sebaran Menegak dan Temporal Suhu

Analisis data dilakukan dengan membuat sebaran menegak suhu, sebaran temporal suhu, anomali suhu bulanan, dan kaitan variasi temporal suhu dengan

angin, *Southern Oscillation Index* (SOI) dan *Dipole Mode Index* (DMI).

Metode yang digunakan untuk penentuan batas setiap kedalaman lapisan mengacu pada standar yang ditetapkan oleh Ross (1970), yaitu kedalaman lapisan tercampur ditentukan pada nilai perubahan suhu terhadap kedalaman (dT/dZ) yang lebih kecil dari 0.1°C , kedalaman termoklin adalah kedalaman dimana gradien suhu terhadap kedalaman (dT/dZ) lebih besar dan sama dengan 0.1°C .

2.5. Spektrum Densitas Energi

Spektrum densitas energi digunakan untuk mengetahui periode fluktuasi dan nilai densitas energi parameter angin dan suhu pada beberapa kedalaman lapisan tercampur dan termoklin. Data deret waktu suhu dan angin terlebih dahulu diubah dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Dalam analisis FFT, komponen *Fourier* ($X(f_k)$) dari deret waktu x_t yang dicatat pada selang waktu h (1 bulan) diberikan oleh (Bendat dan Piersol, 1971):

$$X(f_k) = h \sum_{t=0}^{N-1} x_t \exp \left[-i \frac{2\pi k t}{N} \right] \dots \dots \dots (1)$$

dimana $X(f_k)$ = fungsi FFT pada frekuensi ke $k(f_k)$; N = jumlah pengamatan; $t = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $h = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $i = \sqrt{-1}$ (bilangan imajiner). Nilai fungsi spektrumnya (S_x) diperoleh dengan rumus:

$$S_x = \frac{2h}{N} |X(f_k)|^2 \dots \dots \dots (2)$$

2.6. Korelasi Silang

Korelasi silang antara parameter angin zonal dan angin meridional dengan suhu digunakan untuk menentukan kospektrum densitas energi, koherensi kuadrat dan perbedaan fase diantara kedua parameter. Angin dianggap sebagai variabel X , sedangkan suhu dianggap sebagai variabel Y .

Korelasi silang dapat diperoleh dengan terlebih dahulu menghitung kospektrum densitas energi ($S_{xy}(f_k)$) dari dua pasang data deret waktu x_t dan y_t yang dicatat setiap selang waktu h :

$$S_{xy}(f_k) = \frac{2h}{N} |X^*(f_k)Y(f_k)| \dots\dots\dots (3)$$

dimana $f_k = k/Nh$, $k=0,1,\dots,N-1$; $X^*(f_k)$ =complex conjugate dari $X(f_k)$; $X(f_k)$ =komponen *fourier* dari x_t ; $Y(f_k)$ =komponen *fourier* dari y_t . Koherensi kuadrat ($\gamma_{xy}^2(f_k)$) ditentukan dengan rumus:

$$\gamma_{xy}^2(f_k) = \frac{|S_{xy}(f_k)|^2}{S_x(f_k)S_y(f_k)} \dots\dots\dots (4)$$

dimana $S_x(f_k)$ = densitas energi spektrum $X(f_k)$; $S_y(f_k)$ =densitas energi spektrum $Y(f_k)$. Beda fase dapat dihitung dengan rumus:

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{e_{xy}(f)}{c_{xy}(f)} \right] \dots\dots\dots (5)$$

dimana $e_{xy}(f)$ = bagian imajiner dari $S_{xy}(f_k)$; $c_{xy}(f)$ = bagian nyata dari $S_{xy}(f_k)$

Kospektrum densitas energi menggambarkan besarnya energi pada periode fluktuasi kedua parameter bersamaan. Hubungan yang erat antara fluktuasi kedua parameter tersebut digambarkan oleh nilai koherensi yang tinggi begitu juga sebaliknya. Beda fase menunjukkan perbedaan waktu respon antara kedua periode fluktuasi. Level signifikan densitas energi seluruh parameter yang dianggap signifikan pada level 95% ditandai dengan garis putus-putus warna hijau pada grafik spektrum densitas energi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Sebaran Menegak dan Temporal Suhu

Kisaran suhu dan ketebalan setiap lapisan perairan Senunu tahun 2000-2009 disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Secara umum, lapisan tercampur diwakili oleh isotherm 27°C dan 28°C. Lapisan termoklin digambarkan oleh kontur isotherm yang lebih rapat satu sama lain dibatasi isotherm 26°C di bagian atas dan 14°C di bagian bawah. Lapisan dalam diwakili oleh isotherm yang berada di bawah batas bawah lapisan termoklin yaitu isotherm kurang dari 13°C. Profil suhu menegak pada setiap musim disajikan pada Gambar 2.

Suhu dan ketebalan lapisan tercampur bervariasi berdasarkan musim. Pada Musim Barat suhu berkisar 25.7-28.8°C dan ketebalan lapisan berkisar 68-119 m rata-rata 83 m. Pada Musim Timur suhu 24.4-26.1°C dan ketebalan lapisan berkisar 53-63 m rata-rata 57 m. Lebih tingginya suhu dan lebih tebalnya lapisan tercampur pada Musim barat dibanding Musim Timur diperkirakan pada Musim Barat tibanya APJ ke lokasi studi dan pada Musim Timur adanya pengaruh upwelling. Pada Musim Peralihan I suhu 26.2-28.2°C dan ketebalan lapisan berkisar 45-66 m rata-rata 53.5 m (cenderung mengikuti Musim Barat). Pada Musim Peralihan II suhu 24.5-27.0°C dan ketebalan lapisan berkisar 39-66 m rata-rata 55 m (cenderung mengikuti Musim Timur). Kecenderungan profil musim peralihan mengikuti musim sebelumnya diduga berkaitan dengan perlunya waktu untuk menyesuaikan dinamika gerak musim berikutnya.

Suhu dan ketebalan lapisan termoklin juga bervariasi berdasarkan musim. Pada Musim Barat suhu berkisar 13.3-25.6°C dan ketebalan lapisan berkisar 119-204 m rata-rata 148 m. Pada Musim Timur suhu berkisar 14.5-24.3°C

dan ketebalan lapisan berkisar 83-198 m rata-rata 124 m. Hal ini diperkirakan pada Musim Timur akibatnya terjadinya upwelling mengakibatkan lapisan termoklin terangkat dan cenderung lebih dingin.

Pada musim barat tibanya APJ menyebabkan termoklin tertekan dan suhunya cenderung lebih tinggi karena APJ membawa air hangat. Pada Musim Peralihan I suhu berkisar 13.8-26.1°C dan ketebalan lapisan berkisar 91-177 m rata-rata 137 m. Pada Musim Peralihan II suhu berkisar 14.2-24.4°C dan ketebalan lapisan berkisar 96-160 m rata-rata 127 m. Kondisi musim peralihan cenderung sama dengan musim timur. Hal ini diperkirakan karena ada kenderungan Angin Tenggara di lokasi bertiup lebih awal dan berakhir lebih lama (Wyrtki, 1961).

Lapisan dalam pada Musim Barat dimulai pada kedalaman yang lebih dalam dibandingkan Musim Timur. Hal ini berarti lapisan dalam ikut tertekan ke bawah saat terjadi penebalan lapisan tercampur di Musim Barat dan ikut terangkat naik saat terjadi kenaikan massa

air di Musim Timur. Lapisan dalam relatif stabil dan homogen karena gradien suhu terhadap kedalaman pada lapisan ini kecil. Perubahan ketebalan lapisan dalam dipengaruhi oleh dinamika lapisan termoklin dan lapisan tercampur.

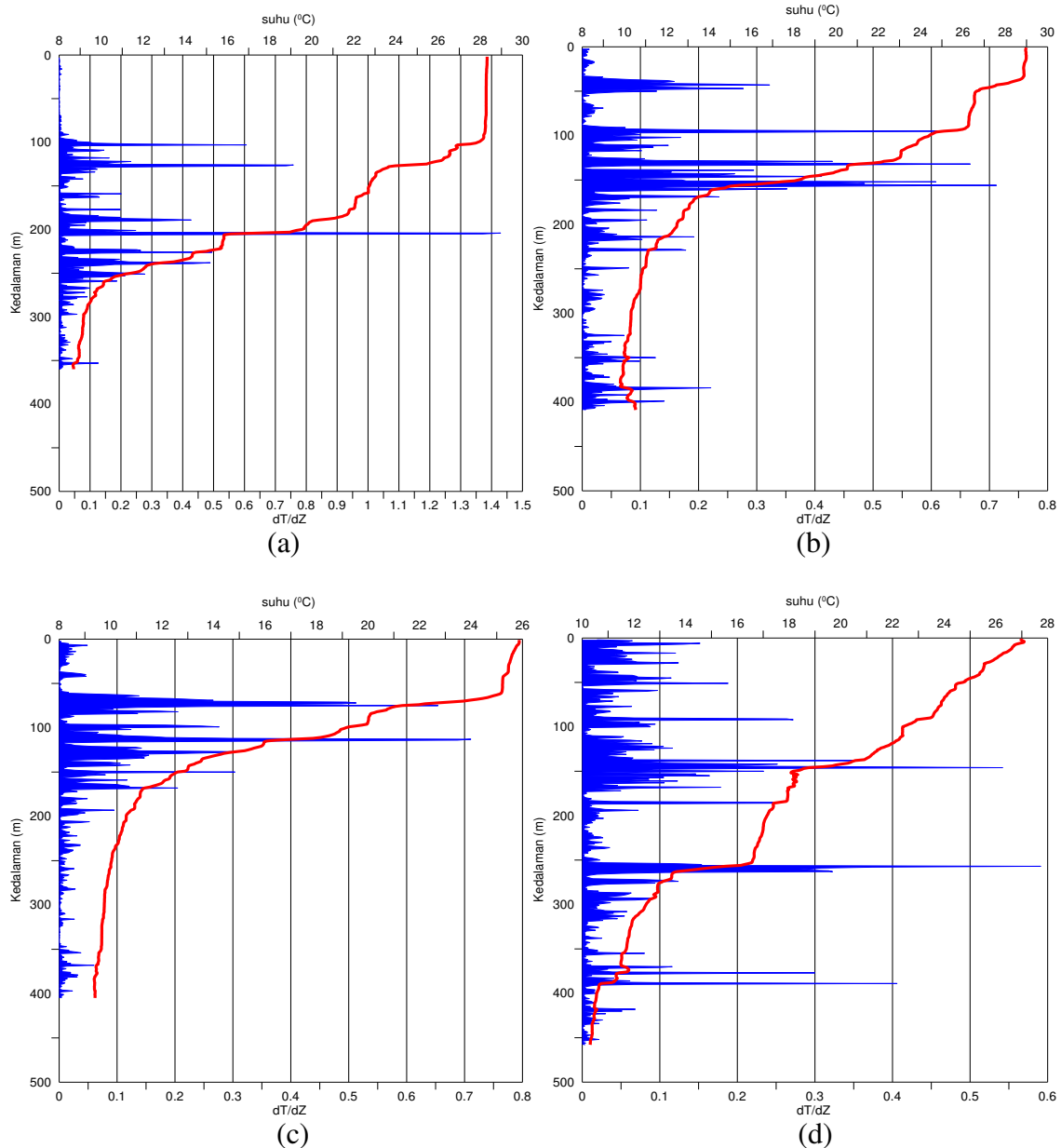
Suhu yang lebih hangat dan menebalnya lapisan tercampur sehingga termoklin tertekan ke bawah pada Musim Barat diperkirakan disebabkan di perairan selatan Jawa hingga Timor mengalir Arus Pantai Jawa (APJ) yang membawa massa air hangat dan berada di lapisan atas (Wyrtki, 1962; Fieux *et al.*, 1993). APJ mengalami intensifikasi ke arah timur karena didorong oleh Angin Muson Barat Laut pada Musim Barat. Sedangkan suhu yang lebih dingin dan menipis lapisan tercampur serta terangkatnya termoklin disebabkan pada Musim Timur di selatan Jawa-Sumbawa terjadi kekosongan massa air lapisan atas akibat diseret Angin Muson Tenggara yang kuat meninggalkan pantai. Untuk mengisi kekosongan tersebut massa air lapisan di bawahnya naik ke atas. Massa air yang bergerak naik

Tabel 1. Kisaran suhu dan ketebalan lapisan tercampur, termoklin, dan dalam di perairan Senunu tahun 2000-2009 pada Musim Barat dan Musim Peralihan I.

Lapisan	Musim barat		Musim peralihan I	
	Suhu (°C)	Tebal (m)	Suhu (°C)	Tebal (m)
tercampur (<i>surface mixed layer</i>)	25.7-28.8	0-83	26.2-28.2	0-54
termoklin	13.3-25.6	84-232	13.8-26.1	55-192
dalam (<i>deep mixed layer</i>)	<13.3		<13.8	

Tabel 2. Kisaran suhu dan ketebalan lapisan tercampur, termoklin dan dalam di perairan Senunu tahun 2000-2009 pada Musim Timur dan Musim Peralihan II

Lapisan	Musim timur		Musim peralihan II	
	Suhu (°C)	Tebal (m)	Suhu (°C)	Tebal (m)
tercampur (<i>surface mixed layer</i>)	24.4-26.1	0-57	24.5-27.0	0-55
termoklin	14.5-24.3	58-182	14.2-24.4	56-183
dalam (<i>deep mixed layer</i>)	<14.5		<14.2	

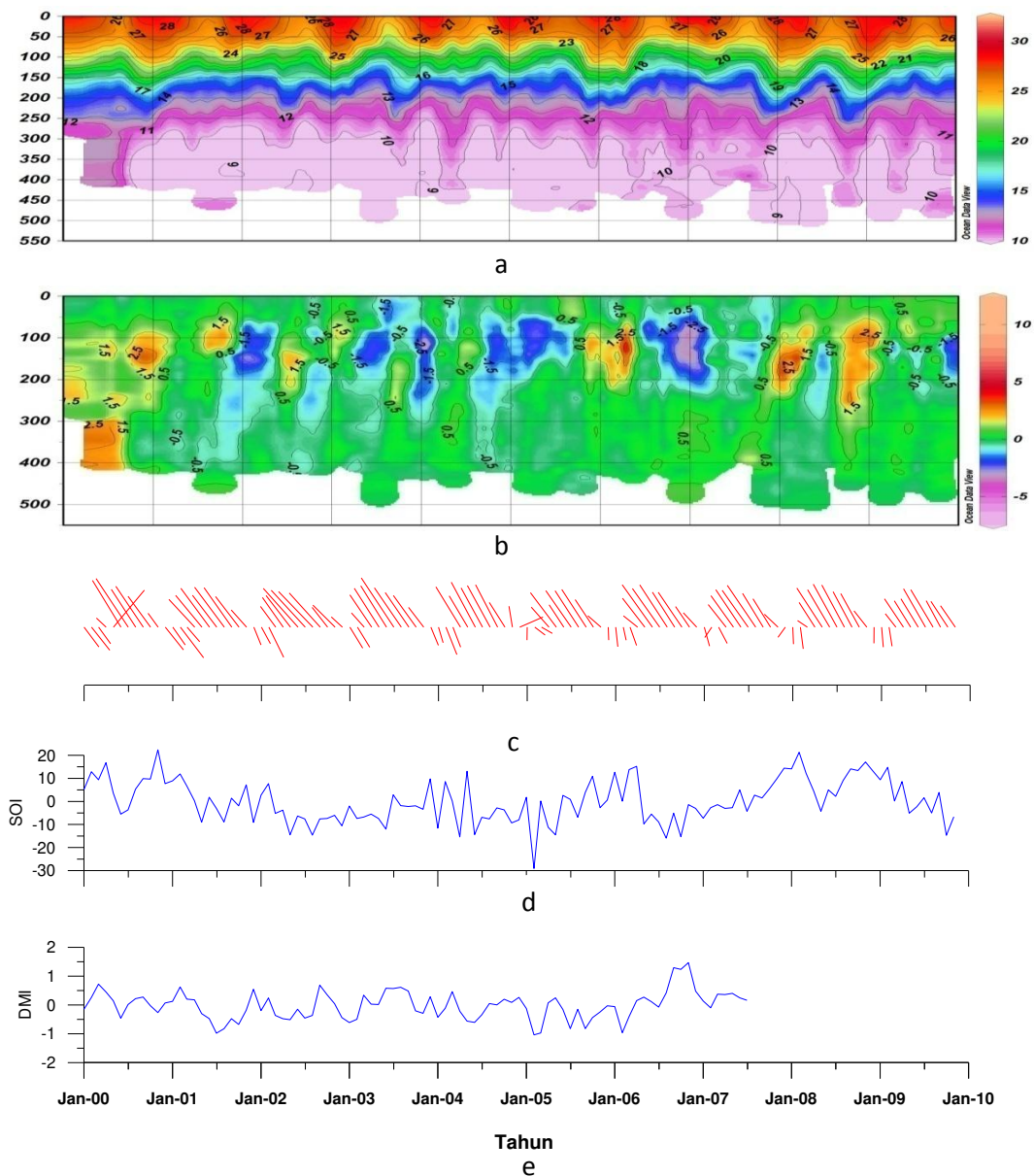


Gambar 2. Profil suhu menegak di stasiun S16 tahun 2008: (a) Januari (musim barat); (b) April (musim peralihan I); (c) Juli (musim timur); (d) Oktober (musim peralihan II). Warna merah menunjukkan nilai suhu pada setiap kedalaman, warna biru menunjukkan perubahan nilai suhu terhadap kedalaman (dT/dZ).

tersebut merupakan massa air perairan dalam dari bagian timur yang bersuhu rendah (Wyrski, 1961; Susanto *et al.*, 2001).

Sebaran temporal suhu di perairan Senenu periode tahun 2000-2009, anomali suhu bulanan dan keterkaitannya dengan angin, ENSO dan IODM disajikan pada Gambar 3.

Suhu permukaan laut (SPL) yang relatif tinggi ditandai isotherm 28°C terdapat di puncak Musim Barat 2001, 2002, 2005 dan 2009. Pada tahun 2003 dan 2008 SPL yang tinggi terjadi di Musim Peralihan I. SPL tinggi di Musim Barat diduga disebabkan masuknya massa air hangat bersalinitas rendah dari bagian barat Teluk Senenu yang dibawa oleh Arus Pantai Jawa (Fieus *et al.*, 1993).



Gambar 3. Sebaran temporal suhu bulanan perairan Senunu di Stasiun S16 (a); anomali suhu bulanan terhadap suhu bulanan rata-rata sepuluh tahun (b); *Stickplot* angin hasil reanalisis; (c) SOI bulanan 2000-2009 (d); DMI bulanan 2000-2007 (e).

Sedangkan SPL yang relatif tinggi pada Musim Peralihan I diduga diakibatkan oleh Gelombang Kelvin (Sprintall *et al.*, 2000).

Ketebalan lapisan tercampur dan letak lapisan termoklin memiliki pola yang berulang setiap tahun sekali (*annual*). Lapisan tercampur paling dalam pada Musim Barat sekitar 100 m,

kedalaman termoklin 100-200 m. Pada Musim Peralihan I lapisan tercampur mulai menipis dan lapisan termoklin mulai terangkat ke arah permukaan. Pada Musim Timur sampai awal Musim Peralihan II lapisan tercampur paling tipis (sekitar 50 m) dan kedalaman termoklin 50-150 m. Lapisan tercampur mulai

menebal kembali pada akhir Musim Peralihan II.

Ketebalan lapisan tercampur tidak persis sama setiap tahun (variasi *interannual*), seperti Musim Barat 2001 dan 2006 relatif lebih tebal dibandingkan Musim Barat tahun-tahun lainnya. Pembentukan lapisan tercampur yang sangat kuat tersebut diduga berkaitan dengan kejadian La Nina. Menurut Susanto *et al.* (2001), selama periode La Nina massa air hangat dari Samudera Pasifik bergerak menuju Samudera Hindia melalui selat di sepanjang Jawa hingga Timor.

Waktu terjadinya penebalan lapisan tercampur juga tidak persis sama setiap tahun, misalnya pada tahun 2001, 2006, dan 2009 penebalan intensif terjadi pada puncak Musim Barat. Sementara pada tahun 2003 dan 2008 penebalan lapisan tercampur terjadi pada Musim Peralihan I. Penebalan lapisan tercampur ini diduga berkaitan dengan datangnya Gelombang Kelvin di sepanjang pantai selatan Jawa-Sumbawa (Sprintall *et al.*, 2000).

Pada Musim Barat tahun 2002, 2004, dan 2007 lapisan tercampur menipis dan lapisan termoklin terangkat dan menebal. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan munculnya gejala El Nino lemah pada tahun 2002 dan 2004 dan IOD positif pada tahun 2007. Menurut Susanto *et al.* (2001), dangkalnya lapisan termoklin di sepanjang pantai selatan Jawa-Sumbawa berkaitan dengan ENSO melalui jalur Arlindo dan anomali Angin Muson Tenggara. Menurut Saji *et al.* (1999), pendangkalan lapisan termoklin di timur Samudera Hindia tropis disebabkan angin zonal di wilayah tersebut bertiup lebih kuat dan lebih lama daripada biasanya.

Anomali suhu yang jelas terjadi di lapisan termoklin. Anomali suhu yang bernilai positif sekitar +1.5 sampai +2.5 terjadi pada Musim Barat tahun 2001, Musim Peralihan I tahun 2006, sepanjang

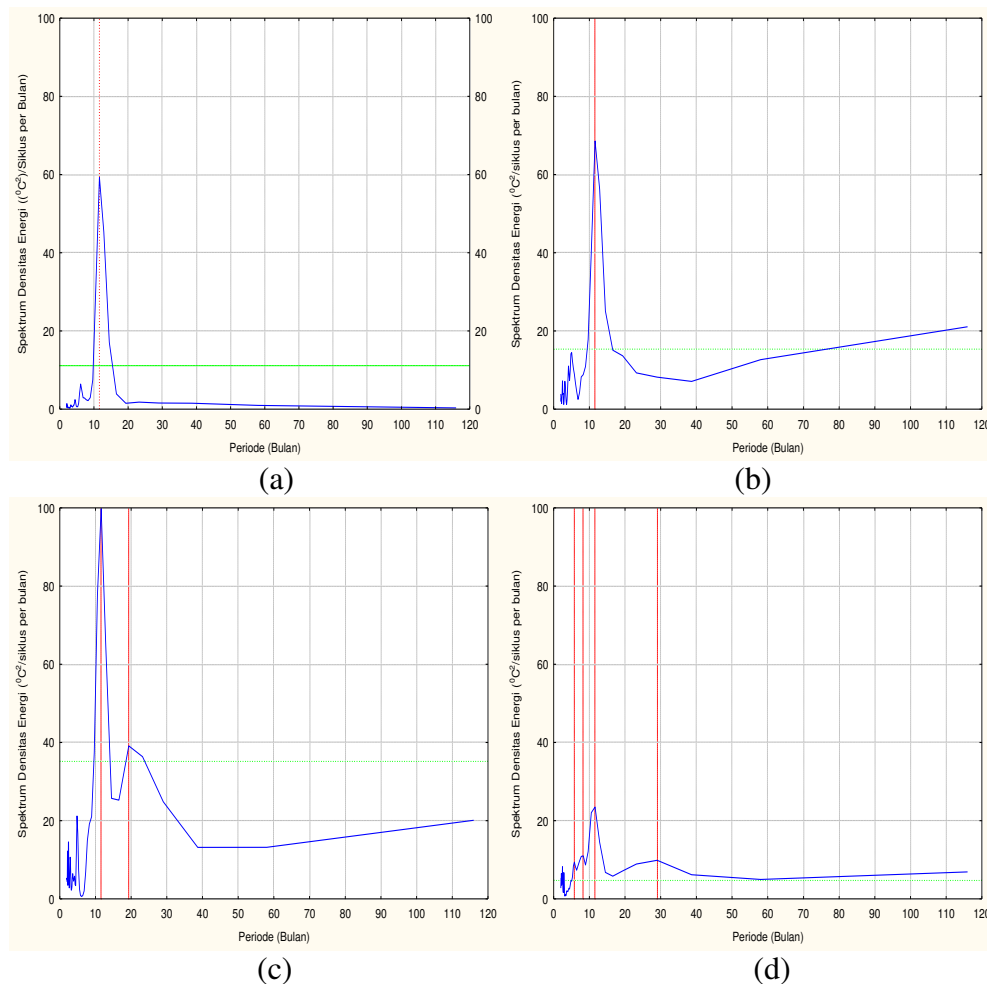
tahun 2008 dan Musim Barat dan Musim Peralihan I tahun 2009. Anomali suhu positif diduga berkaitan dengan kejadian La Nina. Anomali suhu yang lebih tinggi dibandingkan suhu rata-rata disebabkan pada saat kejadian La Nina kolom air hangat menumpuk di bagian barat Samudera Pasifik tropis dan menyebabkan presipitasi yang lebih tinggi dari biasanya di wilayah Indonesia. Hal ini menyebabkan suhu permukaan laut pun lebih hangat. Anomali suhu bernilai negatif sekitar -2.5 sampai -1.5 terjadi pada tahun 2002 dan 2004 diduga berkaitan dengan El Nino dan tahun 2007 diduga berkaitan dengan kejadian IODM. Anomali suhu yang lebih rendah dibandingkan suhu rata-rata disebabkan pada periode El Nino tinggi muka air di Samudera Pasifik tropis bagian barat lebih rendah dari biasanya sehingga transpor massa air dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia melalui Arlindo melemah. Hal ini menyebabkan proses penarikan massa air di selatan Jawa-Sumbawa lebih intensif dari biasanya. Massa air lapisan bawah ini merupakan massa air dingin. Pada saat kejadian IODM positif, suhu permukaan laut menjadi lebih dingin dari biasanya karena angin zonal yang bergerak ke barat bertiup lebih lama dan kuat.

3.2. Spektrum Densitas Energi

Energi yang signifikan terdapat pada semua periode fluktuasi 12 bulan (variasi tahunan) di kedalaman tercampur dan termoklin. Selain itu terdapat energi signifikan di kedalaman 125 m pada periode 19.33 bulan (variasi antar-tahunan) dan di kedalaman 200 m pada periode 6 (variasi setengah tahunan), 8 bulan (variasi intra-tahunan) dan 29 bulan (variasi antar-tahunan) (Tabel 3 dan Gambar 4). Energi angin zonal dan meridional hasil reanalisis yang signifikan pada periode fluktuasi 12 bulan (variasi tahunan) (Tabel 4 dan Gambar 5).

Tabel 3. Periode fluktuasi suhu air laut dengan spektrum energi yang signifikan pada kedalaman 5 m, 75 m, 125 m, dan 200 m di stasiun S16 tahun 2000-2009.

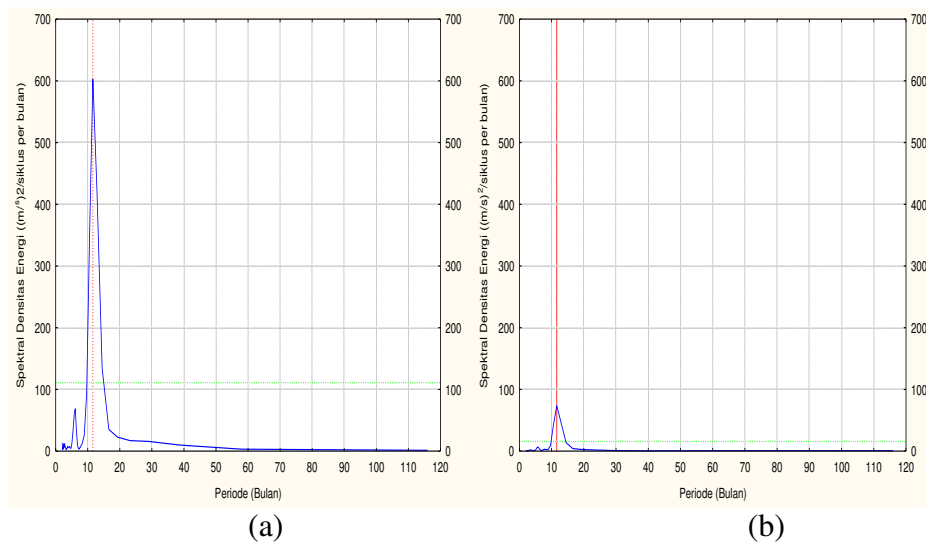
Kedalaman (meter)	Periode (bulan)	Spektrum energi signifikan ($^{\circ}\text{C}^2/\text{Siklus per bulan}$)	Keterangan
5	11.60	59.28	variasi tahunan
75	11.60	68.60	variasi tahunan
125	11.60	99.83	variasi tahunan
200	5.80	9.39	variasi tahunan
	8.29	11.01	
	11.60	23.50	
	29	9.88	



Gambar 4. Spektrum densitas energi suhu air laut di stasiun S16 tahun 2000- 2009. (a) kedalaman 5 m; (b) kedalaman 75 m; (c) kedalaman 125 m; (d) kedalaman 200 m.

Tabel 4. Periode fluktuasi angin dengan spektrum energi yang signifikan di perairan Senunu tahun 2000-2009.

Komponen angin	Periode (bulan)	Spektrum energi signifikan ((m/s) ² /siklus per Bulan)	Keterangan
zonal	11.60	602.56	variasi tahunan
meridional	11.60	73.62	variasi tahunan



Gambar 5. Spektrum densitas energi angin hasil reanalisis di perairan Senunu tahun 2000-2009. zonal (a); meridional (b).

Fluktuasi dengan periode tahunan (12 bulan) menggambarkan pola suhu yang berulang setiap tahun. Dalam satu tahun terdapat satu periode dimana suhu permukaan laut menjadi lebih hangat dan lapisan tercampur menebal (Musim Barat) dan satu periode lainnya dimana suhu permukaan laut lebih dingin dan lapisan tercampur menjadi lebih tipis (Musim Timur). Interval antara dua kondisi yang sama adalah satu tahun. Suhu permukaan laut yang lebih hangat dan menebalnya lapisan tercampur dibawa oleh Arus Pantai Jawa yang didorong Angin Muson Barat Laut (Purba, 2009; Wyrтки, 1962). Suhu permukaan laut yang lebih dingin dan menipisnya lapisan tercampur disebabkan kenaikan massa air di perairan Senunu yang dibangkitkan oleh Angin Muson Tenggara. Dengan demikian fluktuasi tahunan diduga

merupakan respon terhadap variabilitas tahunan Angin Muson (Wyrтки, 1961).

Fluktuasi setengah tahunan (6 bulan) menunjukkan fluktuasi suhu yang terjadi pada satu musim peralihan ke musim peralihan berikutnya. Fluktuasi setengah tahunan diduga berkaitan dengan Gelombang Kelvin yang membawa massa air hangat dan mempertebal lapisan tercampur pada musim-musim peralihan (Sprintall *et al.*, 2000). Fluktuasi setengah tahunan ditemukan pada kedalaman 200 m yang mengindikasikan pengaruh Gelombang Kelvin yang paling kuat pada kedalaman 200 m di perairan Senunu. Pengaruh Gelombang Kelvin yang kuat pada lapisan termoklin juga ditemukan di perairan selatan Jawa bagian barat (Farita *et al.*, 2006). Fluktuasi antar-tahunan ditemukan pada periode 19 bulan (variasi 1.5 tahun) yang mengindikasikan

pengaruh IODM (Adisaputra, 2011) dan periode 29 bulan yang mengindikasikan pengaruh ENSO (Farita *et al.*, 2006). Fluktuasi intra-tahunan ditemukan pada periode fluktuasi 8 bulan yang mengindikasikan pengaruh angin di Samudera Hindia bagian timur (*remote forcing*) yang mengubah periode fluktuasi tahunan di selatan Sumbawa menjadi 8 sampai 24 bulan (Meyers, 1996). Energi signifikan suhu cenderung semakin meningkat dengan bertambahnya kedalaman di lapisan tercampur dan mencapai puncaknya di kedalaman 125 m. Setelah kedalaman tersebut spektrum energi suhu semakin menurun dengan bertambahnya kedalaman. Hal ini berarti bahwa nilai suhu yang paling fluktuatif terdapat pada kedalaman 125 m. Hasil penelitian Farita *et al.* (2006) di selatan Jawa juga menemukan bahwa suhu yang paling fluktuatif terdapat pada lapisan tengah kedalaman termoklin (125 m). Densitas energi angin zonal yang lebih tinggi mengindikasikan fluktuasi angin zonal lebih kuat daripada angin meridional. Perairan selatan Sumbawa dominan dipengaruhi Angin Muson Tenggara yang lebih berorientasi timur-barat dan Angin Muson Barat Laut yang berorientasi barat-timur sehingga komponen zonal menjadi lebih kuat dibandingkan komponen meridional. Penelitian-penelitian di sepanjang selatan Jawa juga menunjukkan komponen zonal lebih kuat dibandingkan komponen meridional (Farita *et al.*, 2006; Tubalawony, 2007; Selowati, 2010; Adisaputra, 2011).

3.3. Korelasi Silang

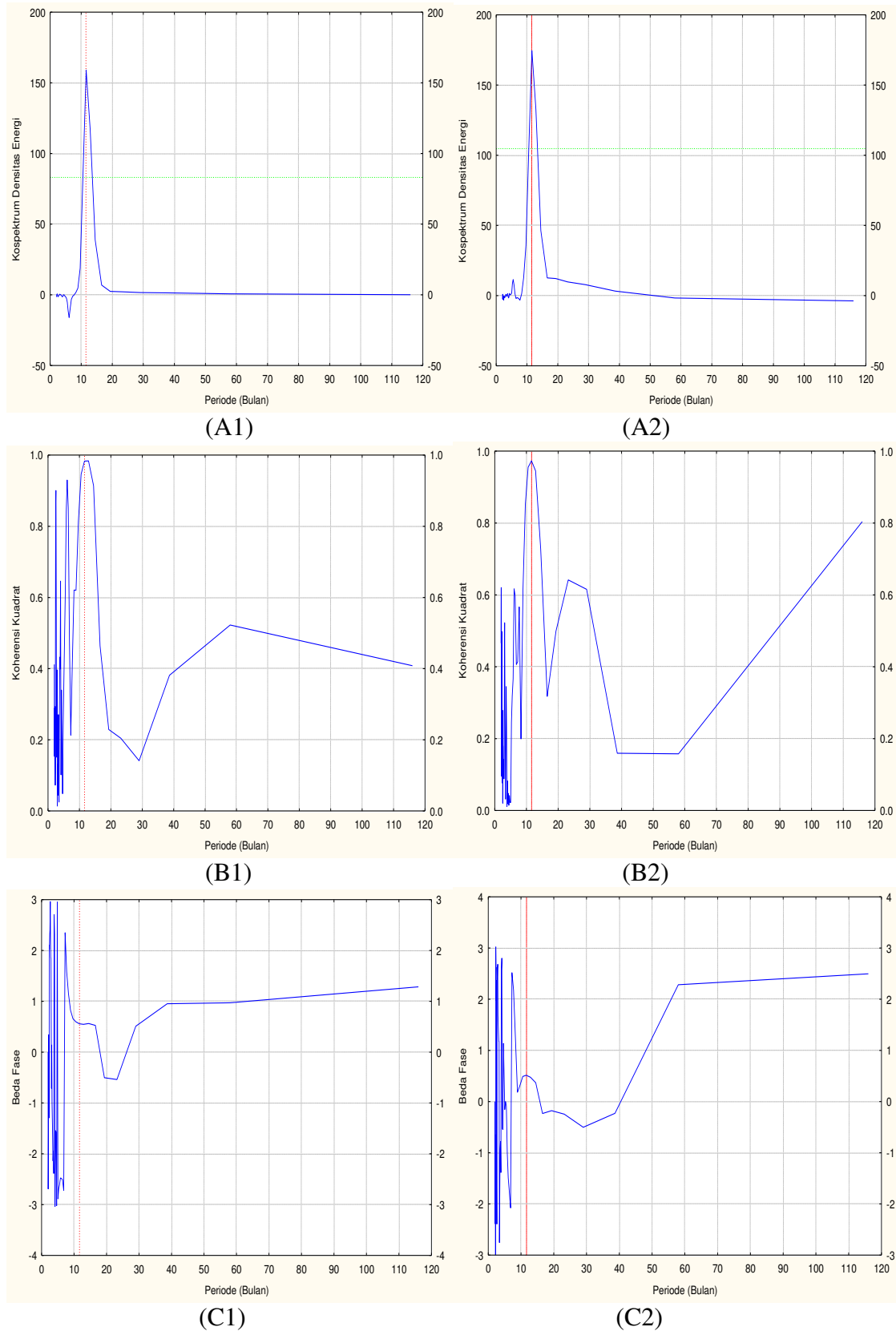
Hasil korelasi silang antara angin hasil reanalisis dengan suhu disajikan pada Gambar 6 dan 7, dan Tabel 5. Hasil korelasi silang antara komponen angin zonal dengan suhu menunjukkan bahwa fluktuasi angin zonal dan suhu berkorelasi pada periode 12 bulan di kedalaman 5 m,

75 m dan 125 m. Seperti pada spektrum densitas energi suhu, energi terbesar saat kedua fluktuasi terjadi bersamaan terdapat pada kedalaman 125 m. Kedua fluktuasi tersebut memiliki tingkat keeratan tinggi yaitu 0.98 di kedalaman 5 m, 0.97 di kedalaman 75 m dan 0.92 di kedalaman 125 m. Beda fase antara kedua parameter adalah 30 hari di kedalaman 5 m, 27 hari di kedalaman 75 m dan 22 hari di kedalaman 125 m. Artinya fluktuasi suhu terjadi setelah 30 hari angin berfluktuasi di kedalaman 5 m, 27 hari angin berfluktuasi di kedalaman 75 m dan 22 hari angin berfluktuasi di kedalaman 125 m.

Sedangkan fluktuasi angin meridional dan suhu berkorelasi pada periode 12 bulan di semua kedalaman yang diteliti dengan tingkat keeratan tinggi yaitu 0.97 di kedalaman 5 m, 0.94 di 75 m, 0.90 di 125 m dan 0.69 di 200 m. Energi semakin besar dengan meningkatnya kedalaman dan terbesar pada kedalaman 125 m kemudian menurun pada 200 m. Fluktuasi angin mendahului fluktuasi suhu selama 72 hari di kedalaman 5 m, 71 hari di 75 m dan 125 m dan 66 hari di 200 m.

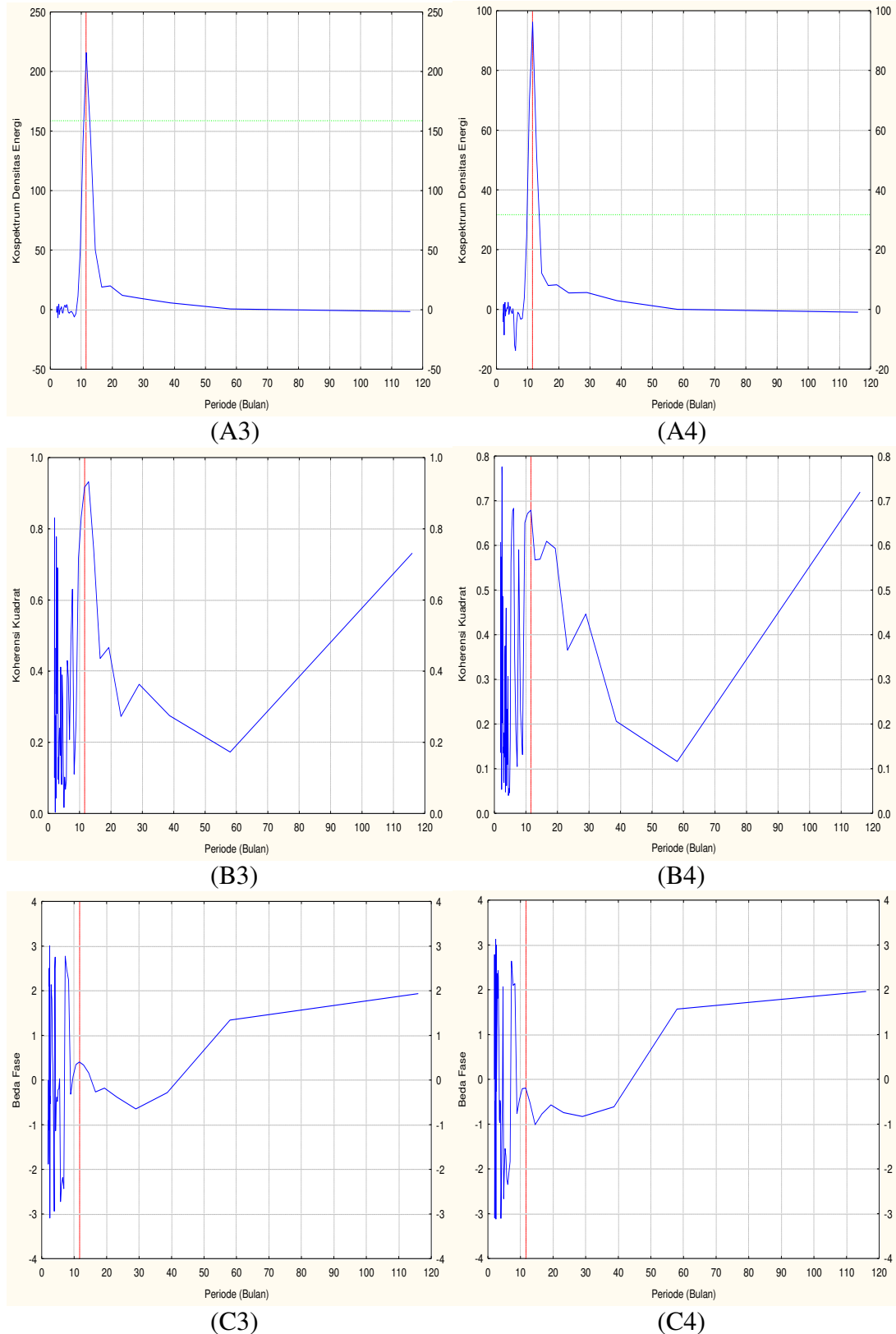
Hasil korelasi silang antara angin hasil reanalisis dengan suhu pada beberapa kedalaman lapisan tercampur dan termoklin di perairan Senunu menunjukkan bahwa kedua fluktuasi berkorelasi erat pada periode 12 bulan atau terdapat variasi tahunan. Periode fluktuasi ini diduga berkaitan dengan dinamika sistem Angin Muson yang bertiup di atas perairan Senunu.

Penelitian Farita *et al.* (2006) di selatan Jawa bagian barat juga menemukan energi signifikan pada periode fluktuasi tahunan di kedalaman 0 m, 100 m dan 600 m. Beda fase antara angin dengan suhu di selatan Sumbawa tidak jauh berbeda dengan selatan Jawa dimana pada penelitian yang sama ditemukan bahwa beda fase antara angin zonal dengan suhu sekitar 32-36 hari dan



Gambar 6. Korelasi silang antara angin zonal hasil reanalisis dengan suhu kedalaman 5 m (A1., B1, C1), 75 m (A2, B2, C2) di stasiun S16 tahun 2000-2009. A. Kospektrum densitas energi; B. Koherensi kuadrat; C. Beda fase.

Variabilitas Suhu di Perairan Senunu, Sumbawa Barat



Gambar 7. Korelasi silang antara angin zonal hasil reanalisis dengan suhu kedalaman 125 m (A3, B3, C3), 200 m (A4, B4, C4) di stasiun S16 tahun 2000-2009. A. Kospektrum densitas energi; B. Koherensi kuadrat; C. Beda fase.

Tabel 5. Hasil korelasi silang angin dengan suhu di stasiun S16 tahun 2000-2009.

komponen angin	kedalaman (Meter)	periode fluktuasi (Bulan)	kospektrum energi signifikan $((m/s)^2/spb).$ $((^{\circ}C^2)/spb)$	koherensi	beda fase	
					(\tan^{-1})	hari
zonal	5	12	158.94	0.98	0.56	30
	75	12	174.59	0.97	0.51	27
	125	12	215.90	0.92	0.40	22
meridional	5	12	64.29	0.97	2.98	72
	75	12	67.60	0.94	2.94	71
	125	12	77.60	0.90	2.84	71
	200	12	22.01	0.69	2.26	66

beda fase antara angin meridional dengan suhu sekitar 65-72 hari. Penelitian Adisaputra (2011) di perairan barat Sumatera juga menunjukkan bahwa energi signifikan saat angin dan suhu berfluktuasi bersamaan pada periode tahunan di kedalaman 5 m dan 75 m. Beda fase antara fluktuasi angin zonal dengan fluktuasi suhu adalah 44 hari dan 8 hari. Beda fase antara angin meridional dengan suhu berkisar 67-72 hari di kedalaman 5 m, 75 m dan 125 m.

IV. KESIMPULAN

Variasi musiman, tahunan dan antara-tahunan dari stratifikasi vertikal suhu secara temporal mengindiskan adanya pengaruh sistem Angin Muson dan fenomena regional di S. India dan S. Pasifik. Saat Angin Muson Tenggara, lapisan tercampur lebih tipis dengan suhu lebih rendah, lapisan termoklin terangkat dengan suhu lebih rendah. Sebaliknya saat Angin Muson barat Lau bertiup, lapisan tercampur lebih tebal dengan suhu lebih tinggi dan lapisan termoklin lebih tertekan. Pada Musim Peralihan I dan II, stratifikasinya cenderung mirip dengan kondisi musim sebelumnya. Sementara suhu lapisan dalam tidak banyak bervariasi tetapi batas atas lapisan ini

tertekan saat Musim Barat dan terangkat saat Musim Timur.

Pengaruh dari fenomena regional terlihat dari lebih tebalnya lapisan tercampur pada tahun 2001, 2006 dan 2009 yang berkaitan dengan terjadinya fenomena La Nina di tropis S. Pasifik. Pengaruh Gelombang Kelvin terlihat dengan menebalnya lapisan tercampur pada Musim Peralihan I 2003 dan 2008. Lapisan tercampur yang lebih tipis pada tahun 2002 dan 2004 merupakan indikasi pengaruh dari fenomena El Nino di tropis S. Pasifik. Sementara penipisan lapisan termoklin tahun 2007 berkaitan dengan terjadinya fenomena IODM positif di tropis S. India.

Analisi deret waktu memperlihatkan energi signifikan suhu di semua kedalaman dan angin terdapat pada periode fluktuasi 12 bulan (variasi tahunan), periode 6 bulan (setengah tahunan) di kedalaman 200 m dan periode antar-tahunan yaitu 19 bulan di kedalaman 125 m dan 29 bulan di kedalaman 200 m. Fluktuasi tahunan disebabkan pengaruh sistem Angin Muson yang bertiup di atas perairan Senunu. Fluktuasi setengah tahunan berkaitan dengan melintasnya Gelombang Kelvin. Fluktuasi antar-tahunan pada periode 19 bulan mengindikasikan pengaruh IODM,

sedangkan periode fluktuasi 29 bulan berkaitan dengan ENSO. Korelasi silang angin dengan suhu menunjukkan energi signifikan saat kedua parameter berfluktuasi secara bersamaan pada periode tahunan (12 bulan).

DAFTAR PUSTAKA

- Adisaputra, A. 2011. Variabilitas suhu, arus dan angin di perairan barat Sumatera serta inter-relasinya dengan *Indian Ocean Dipole Mode* (IODM) dan *El Nino Southern Oscillation* (ENSO). Skripsi. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Institut Pertanian Bogor. Bogor. 145hlm.
- Farita, Y., M. Purba, dan A. Atmadipoera. 2006. Variabilitas suhu laut di selatan Jawa Barat. *Bulletin PSP*, XV(3):139-157.
- Ffield, A. and A.L. Gordon. 1996. Tidal mixing signatures in the Indonesia Seas. *J. Phys. Ocean.* 26:1924-1937.
- Ffield, A., K. Vranes, A.L. Gordon, R.D. Susanto, and S. L. Garzoli. 2000. Temperature variability within Makassar Strait. *J. Geophys. Res. Lett.*, 27:237-240.
- Fieux, M., C. Andrie, P. Delecluse, A.G. Illahude, A. Kartavtseef, F. Mantisi, R. Molcard, and J. Swallow. 1993. Measurements within the Pacific-Indian Ocean Throughflow Region. *Deep-Sea research I*, 41(7):1091-1130.
- Gordon, A.L., C.F. Giulivi, and A.G. Illahude. 2003. Deep topographic barriers within the Indonesian seas. *Deep-Sea Research II*, 50:2205-2228.
- Hautala, S., J. Reid, and N. Bray. 1996. The distribution and mixing of Pacific water masses in the Indonesian seas. *J. Geophys. Res.*, 101(C5):12,375-12,389.
- Irawati, N. 2005. Karakteristik tekanan udara dan suhu permukaan laut di pantai barat Sumatera dan pantai timur Afrika serta kaitannya dengan kejadian dipole mode di Samudera Hindia Tropis. Tesis. Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Bogor. 41hlm.
- McCLean, J.L. and D.P. Ivanova. 2005. Remote origins of interannual variability in the Indonesian Throughflow region from data and a global Parallel Ocean Program simulation. *J. Geophys. Res.* 110, C10013.
- Meyers, G. 1996. Variation of Indonesian throughflow and the El Nino Southern Oscillation. *J. Geophys. Res.*, 101(C5):12.255-12.263.
- Nybakken, J.W. 1992. Biologi laut: suatu pendekatan ekologis. Diterjemahkan oleh H.M. Eidman, Koesbiono, D.G. Bengen, M. Hutomo, dan Sukardjo. PT Gramedia. Jakarta. Indonesia. 496hlm.
- Pickard, G.L. and W.J. Emery. 1990. Descriptive physical oceanography. Pergamon Press. Oxford. 320p.
- Purba, M. 2009. Dynamics of south Java-Sumbawa waters during south east monsoon. International Symposium of Marine Science, Technology and Policy. World Ocean Conference. Manado, 12-14 Mei 2009.
- Ross, D.A. 1970. Introduction to oceanography. Appleton-century-cofts. Meredith Corporation. New York. 384p.
- Saji, N.H. and T. Yamagata. 2003. Possible impacts of Indian Ocean Dipole mode events on global climate. *Climate Research*, 25:151-159.
- Saji, N.H., B.H. Goswami, P.N. Vinayachandran, and T. Yamagata. 1999. A dipole mode in the tropical

- Indian Ocean. *Nature*, 401:360–363.
- Selowati, Y.G. 2010. Variabilitas arus geostropik permukaan dan angin di perairan selatan jawa. Skripsi. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Insitut Pertanian Bogor. Bogor. 45hlm.
- Sprintall, J., A.L. Gordon, R. Murtugudde and R.D. Susanto. 2000. Semiannual Indian Ocean forced Kelvin wave observed in the Indonesian seas in May 1997. *J. Geophys. Res.* 105: 17217–17230.
- Susanto, R.D. and A.L. Gordon. 2005. Velocity and transport of the Makassar Strait throughflow. *J. Geophys. Res.* 110, C01005.
- Susanto, R.D., A.L. Gordon and Q. Zheng. 2001. Upwelling along the coasts of Java and Sumatra and its relation to ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, 28(8):1599–1602.
- Tubalawony, S. 2007. Kajian klorofil-a dan nutrien serta interelasinya dengan dinamika massa air di perairan barat Sumatera dan selatan Jawa-Sumbawa. Disertasi. Sekolah Pascasarjana. Insitut Pertanian Bogor.
- Wyrtki, K. 1961. Physical oceanography of the southeast Asian waters, NAGA report, vol. 2, Univ. of Calif., San Diego. 195p.
- Wyrtki, K. 1962. The upwelling in the region between Java and Australia during the south-east Monsoon. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 17:217-225.
- Diterima : 20 Oktober 2013*
Direvisi : 11 Februari 2013
Disetujui : 3 September 2013

